

## 대기를 통하여 한반도 지표면으로 공급되는 방사성 핵종( $^{137}\text{Cs}$ 과 $^{210}\text{Pb}$ )에 관한 연구

### A Study on the Atmospheric Deposition of Radionuclides ( $^{137}\text{Cs}$ and $^{210}\text{Pb}$ ) on the Korean Peninsula

이 윤 구 · 김 석 현<sup>1)</sup> · 홍 기 훈<sup>1)</sup> · 이 광 우

한양대학교 이과대학 지구해양과학과

<sup>1)</sup>한국해양연구소 생지화학연구소실

Youn-Koo Lee, Suk-Hyun Kim<sup>1)</sup>, Gi-Hoon Hong<sup>1)</sup>, Kwang Woo Lee

*Department of Earth & Marine Sciences, Hanyang University*

<sup>1)</sup> *Biogeochemical Laboratory, Korea Ocean Res. & Dev. Inst.*

#### Abstract

In order to investigate geochemical behaviors of artificial radionuclide( $^{137}\text{Cs}$ ), the fallout deposition of artificial radioisotope( $^{137}\text{Cs}$ ) was measured from May to October in 1994 at the Korea Ocean Research & Development Institute(KORDI), Ansan, Kyunggido, Korea. And to study radioisotopic behavior and cumulative action in soil, soil samples were collected from Kwang-Leung Forest, Kyunggido, and artificial radioisotope( $^{137}\text{Cs}$ ) and natural radioisotope( $^{210}\text{Pb}$ ) were identified.

The amount of  $^{137}\text{Cs}$  in atmosphere collected by wet deposition process in May was found to be 4.95 to 11.96  $\text{mBq m}^{-2}$  whereas the amounts of  $^{137}\text{Cs}$  by dry deposition process in May and October were found to be 4.0  $\text{mBq g}^{-1}$  and 3.0  $\text{mBq g}^{-1}$ , respectively. The amount of  $^{137}\text{Cs}$  accumulated in soil was measured to be 311  $\text{mBq cm}^{-2}$ , which contained 83% of the total inputs

from atmospheric fallout(374  $\text{mBq cm}^{-2}$ ) since 1960s. In addition, the accumulation rate and the annual flux of  $^{210}\text{Pb}$  into soils were 0.32  $\text{cm yr}^{-1}$  and 34  $\text{mBq cm}^{-2}\text{yr}^{-1}$ , respectively. Conclusively, it was found that artificial radioisotopes were mainly from the stratosphere and soil resuspension of continental China through the troposphere.

#### 1. 서 론

핵실험에 의해 생성되는 인공방사성 핵종은 성층권(stratosphere)과 상층 대류권(upper troposphere)으로 이동되어 대기입자(airborne particle) 형태로 대기중에 머물다가 습상 및 건상낙하에 의해 육지나 바다에 축적된다. 육상에 낙하된 방사성 물질은 부상과 낙하를 반복함으로(Katsumi와 Yukio, 1984), 대기를 통하

여 낙하하는 인공방사능의 정량분석 및 거동에 관한 연구는 국민의 건강과 외부세계의 핵활동이나 핵사고를 감지하는 수단으로서 대단히 중요하다.

습상 및 건상 낙하는 대기에서 방사성 물질을 제거하는 가장 중요한 과정중의 하나로서 이러한 기작에 의한 제거과정에 대한 이론적 및 실험적 연구가 일부 수행되어 왔으나(Burchfield et al., 1983; Hirose et al., 1987), 습상 및 건상낙하 과정에는 매우 많은 요인이 복합적으로 작용하므로 이에 따른 구체적인 과정은 거의

알려진 바가 없다.

핵 활동에 의한 인공방사성 핵종의 유입 및 거동을 알기 위해서는 비교적 반감기가 긴  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  같은 인공 방사성 핵종의 낙하량에 대한 자료가 필요하다. 특히 최근까지 20여회나 핵실험을 수행한 중국의 동쪽에 위치한 한반도는 강한 편서풍의 영향으로 대기를 통한 방사성 핵종의 유입이 많을 것으로 사료되나 현재까지는 자료가 극히 적은 상태이다.

본 연구에서는 인공방사성 핵종의 습상 및 건상 낙하량을 정량적으로 분석하고 지표에 도달한 후의 인공방사능의 침적을 및 거동을 규명하기 위하여 토양중 인공방사능의 수직분포를 조사하여, 한반도 지표면으로 유입되는 인공방사성 핵종의 이동경로 및 그 기원과 지표에 낙하하는 인공방사성 핵종의 수치를 정량적으로 추정하였다.

## 2. 시료 채취 및 분석

빗물 시료는 1994년 5월부터 10월까지 한반도 중부 서해안의 경기도 안산에 위치한 한국해양연구소(37° 17' N, 126° 50' E)의 제3 연구동 옥상에서 1.5m×1.8m의 PVC로 된 채집기를 2개 사용하여 매회 내리는 빗물을 채취하였다. 채취된 시료는 HCl(6N)을 가하여 pH를 2~3으로 하여 방사성 핵종이 시료 보관통에 흡착되지 않고 미생물의 번식이 억제되도록 한 다음 분석시까지 실온에서 보관하였다.  $^{137}\text{Cs}$ 의 분석을 위하여는 80~140%의 시료를 그림 1에서와 같이 ammonium phosphomolybdate(AMP) 공침법을 사용하여 전처리를 한 후  $\gamma$ -spectrometry 장치(Canberra International: Intrinsic high-purity germanium crystal)로 계측하였다.

건상낙하 시료는 빗물과 동일한 위치에서 가로, 세로, 높이가 각각 1m인 정방형의 PVC 채집기를 사용하여 1개월간 계속적으로 채취하여 수분을 증발시켜 제거한 후 시료를 도가니에 옮겨 담아 가열로에서 500°C로 가열한 후  $\gamma$ -spectrometry 장치로 계측하였다.

토양 시료는 광릉 수목원의 보호림내에서 1994년 10월 비교적 인공적인 교란이 적은 것으로 알려진 활엽수만 있는 소리산 중턱(37° 44' N, 127° 00' E)의 경사가 완만한 지역을 선택하여 내경이 66.25mm인 PVC 튜브를 이용하여 주상 시료를 채취한 후, 실험실로 옮겨 표층부터 1cm 간격으로 잘라 각각 부시료를 취하였다. 깊이별로 분리된 분석용 시료는 105°C의 건조로에서 24시간 건조시켜 함수율을 측정한후 막자사발로 분말을 만

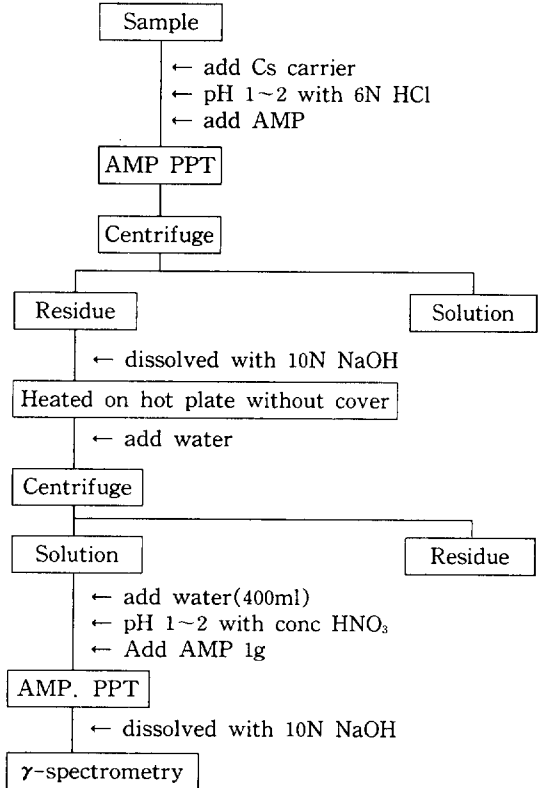


Fig. 1. A flow diagram of analytical procedure for  $^{137}\text{Cs}$ .

든 뒤 100-mesh 플라스틱 체로 걸러 통과된 것을 다시 105°C의 건조로에 수시간 건조 수분을 제거한 뒤  $\gamma$ -spectrometry 장치로 계측하였다.

$\gamma$ -선으로 방사선 동위 원소를 정량하기 위해서 Multi-Channel Analyzer의 각 채널당 에너지 할당, 검색기의 에너지에 따른 효율보정(energy efficiency calibration), 그리고 시료의 높이에 따른 높이효과(height effect)를 고려하여 분석된 핵종들의 방사능 값을 보정 계산했고, 방사능은 건조된 시료 무게에 따라  $\text{Bq g}^{-1}$ 으로 표시하였으며, 통계적인 계수 오차는  $\pm 1\sigma$  표준편차로 나타내었다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3. 1 대기를 통한 $^{137}\text{Cs}$ 의 강하

습상낙하량에 대해서는 매번의 강수시마다 시료를 채취하여 강수량이 적었던 날에는 1개월 단위로 시료를

Table 1. Cumulative deposition and concentration of <sup>137</sup>Cs at Ansan, Korea, during May-September 1994.

Collection	date	Rain fall*(mm)	<sup>137</sup> Cs		
			mBq/m <sup>2</sup>	mBq/l	M. D. L**(mBq/l)
'94	5. 3	27.95	6.39±1.49	0.23±0.05	
	5. 14-15	54.60	4.95±1.77	0.09±0.03	
	5. 24-25	58.20	11.96±1.32	0.21±0.02	
	6. 23-26	22.45			7.27E-2
	6. 30	51.55			8.24E-2
	7. 1-31	87.25			5.16E-2
	8. 1-25	143.30			9.77E-2
	8. 28	96.70			7.46E-5
	9. 2	14.35			4.87E-2
	9. 5-26	114.60			6.54E-2

\* 수원, 인천 지방 측우소 강우량의 평균치.

\*\* MDL : minimum detection limit

80l 이상이 되게 합하여 분석하였고 그 외에는 매회 측정하였다. 건상낙하량은 한 달 단위로 시료를 채취하여 분석하였다. 시료의 채취기간이 6개월로 제한되어 있어서 전체적인 연간 낙하량과 계절 변화를 정확하게 추론하는 데는 어려움이 따른다. 그러나 이 자료를 가까운 일본에서의 자료(Katuragi, 1983; Katsuragi et al., 1986; Hirose et al., 1987; Aoyama et al., 1991) 등과 비교하고 이 기간동안의 인공 방사능핵종의 한반도에서의 낙하량 및 낙하유형을 살펴봄으로써 앞으로의 낙하량에 대한 비교치로 삼는데 중요하다고 판단된다.

습상낙하량은 총 10개의 시료중에서 5월에 내린 3번의 강수에서 <sup>137</sup>Cs의 농도가 0.09~0.23mBq l<sup>-1</sup>로 측정되었으며 그 외 시기의 강수에서는 측정하한치 이하로 검출되었다. 측정 하한치의 값은 반감기와 측정 시간의 함수로 제작회사가 제공한 프로그램을 이용하여 구했으며, 단위 면적당 낙하량으로 계산하면 5월중 3번의 강수에서 4.95~11.96mBq m<sup>-2</sup>, 평균 7.77mBq m<sup>-2</sup> (표 1)이었다. 이 때의 강수량은 기상월보에 의하면 27~658mm, 총 강수량은 141mm, 한회 평균 47mm로 지역별로 평년보다 10~170mm 정도 많은 강우량을 보였다.

일반적으로 북반구에서 성층권에 머물던 인공방사능 핵종이 대류권으로 유입되는 시기는 봄과 초여름에 최대가 되고 가을에 최소가 된다고 알려져 있다. 이것은 1960년 6월 부터 익년 5월까지 네덜란드의 리즈비즈크(52° 3' N, 4° 20' E)에서 조사한 결과 실제로 대류권계면의 고도가 늦봄에 다소 낮아지며 특히 북위 30°N, 고도 13km 부근에서 성층권의 대기가 대류권으로 유입됨이 밝혀져 (Bleichrodt와 van Abkoude, 1963) 위의 결과를 뒷받침 한다. 이외에도 기상현상에 의한 뇌우

나 천둥을 겸한 태풍이 발생할때 역시 성층권과 대류권의 교환량이 증가하게 된다(Bleichrodt와 van Avkoude, 1963; Noyce et al, 1971; Burchfield et al., 1983; Dibb, 1989).

한반도에서 검출된 인공 방사성 핵종은 성층권에서의 유입과 대류권으로의 이동 그리고 재부상에 의한 부유물질의 재낙하로 생각해 볼수 있다. 1960년 부터 1988년 까지 29년에 걸쳐 측정된 <sup>137</sup>Cs와 <sup>90</sup>Sr의 낙하량에 대한 일본의 자료(Katsuragi, 1983; Aoyama, 1991)에 의하면 <sup>137</sup>Cs 낙하량은 봄철에 최고치를 보이며 가을에 최소치를 나타내어(그림 2), 5월중에는 <sup>137</sup>Cs이 검출되나 가을철에는 검출되지 않는 본 연구의 결과와 일치하였다. 1994년 5월에 검출된 <sup>137</sup>Cs의 양을 1988년 일본에서 측정된 자료(Aoyama, 1991)와 비교해 보면 약 1/3 수준이며 이것은 일본에서의 <sup>137</sup>Cs의 낙하량이 시간에 따라 지수함수적으로 감소하는 선상에 해당된다. 따라서 한반도에서의 인공방사성 핵종의 낙하량은 이웃 일본과 비슷할 것으로 추론할 수 있다.

<sup>137</sup>Cs의 성층권에서의 잔류시간을 1.4년, 대류권에서의 잔류시간을 약 25일로 보면(Aoyama et al., 1991), 최근에 일어난 체르노빌 원전 사고가 1986년에 일어났는데 이로 인한 인공방사성 핵종이 대류권에 유입된 것은 거의 제거되었다고 볼 수 있어 성층권에 유입되어 있는 현재량은 미미하다고 볼 수 있다. 또한 성층권에서 형성된 <sup>7</sup>Be의 양이 천둥과 번개를 동반한 태풍이 발생할 때 성층권과 대류권의 혼합으로 한반도 중부 서해안에 내린 빗물에서 증가치를 보인다는 박(1993)의 결과에 의하면 성층권과 대류권의 혼합으로 <sup>7</sup>Be의 양이 증가하면 <sup>137</sup>Cs의 양도 증가해야 겠지만, 본 연구에서 <sup>137</sup>Cs의 양이 태풍이 분 7월(2회), 8월(2회), 9월(1

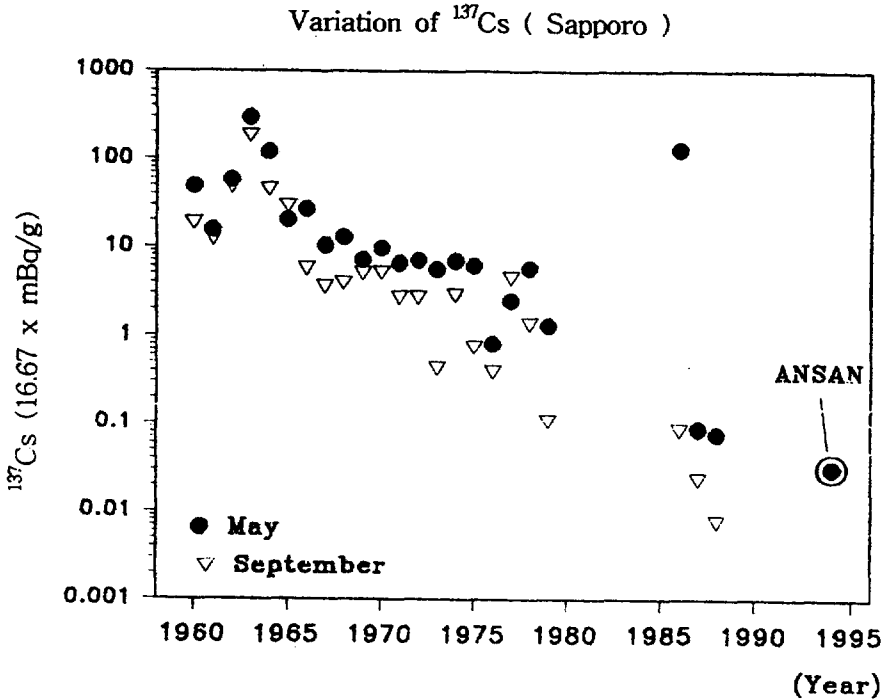


Fig. 2. The trends of the measured  $^{137}\text{Cs}$  at Sapporo in May and September during 1960~1988 and at Ansan in May 1995.

회)에 검출되지 않는 것은 한반도에서 성층권으로부터 대류권으로 유입되는  $^{137}\text{Cs}$ 의 양이 적었다고 볼 수 있다. 따라서 5월에 측정된  $^{137}\text{Cs}$ 는 봄철에 성층권과 대류권의 혼합으로 인한 성층권의 잔류 인공방사성 핵종의 유입과 봄철 한반도를 지배하는 고온 건조한 양쯔강 기단에서 떨어져 나오는 이동성 고기압이 변질되어 한반도를 통과 할때 부는 서풍 그리고 제트기류의 영향으로 상층기류를 타고 유입하는 황사의 영향을 생각할 수 있으나 예년과는 달리 1994년에는 황사현상이 일어나지 않았으므로 황사에 기인한 중국대륙으로의 재부상에 의한 유입도 또한 미미하다고 볼 수 있다.

따라서 한반도에 유입된 인공방사성 대류권을 통한 중국 대륙으로 부터의 유입과 성층권으로의 미미한 유입의 합인 결과로 사료되어지나 5월이전의 3, 4월의 봄철 중국쪽의 기단의 영향을 받은 시료를 채취하기 않아 확인할 수는 없다.

건상낙하량은 1994년 5월에서 10월까지의 총 6개의 시료에서  $^{137}\text{Cs}$ 의 월별 낙하량을 조사하였는데 5월 시료에서는  $4.0 \pm 0.4 \text{ mBq g}^{-1}$ 이 검출되었으며 6, 7, 8 및 9월의 시료에서는 정량화할 수 없는 미미한 양이 검출되

었고 10월 시료에서는  $3.0 \pm 0.5 \text{ mBq g}^{-1}$ 이 검출되었다. 이것은 빗물 시료에서 5월에  $^{137}\text{Cs}$ 가 검출되고 6, 7, 8 및 9월 시료에서는 검출되지 않는 것과 일치한다.

또한 10월에는 이동성 고기압이 충분히 변질되지 않아 간혹 북서기류에 의해 중국의 대기가 한반도로 유입될 경우가 있어(국립환경연구원, 1991), 10월에 건상낙하에서 검출된  $^{137}\text{Cs}$ 는 기원이 중국 대륙일 가능성을 시사해 준다고 하겠다.

### 3. 2 토양중의 $^{210}\text{Pb}$

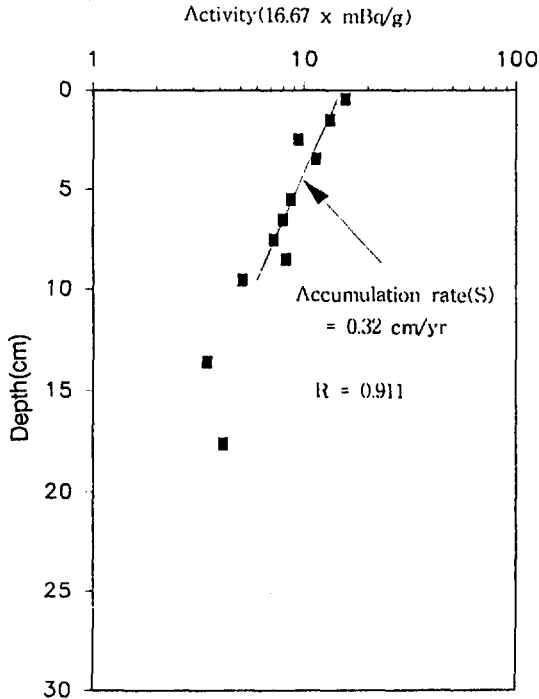
대기를 통하여 공급된 인공방사성 핵종의 토양에서의 축적을 및 거동을 알기 위하여 광릉 수목원의 소리산 중턱에서 채취한 토양 시추시료에서  $^{137}\text{Cs}$ 과  $^{210}\text{Pb}$ 의 농도를 깊이별로 조사하였으며 그 결과는 표 2 및 그림 3에 나타나 있다.

대부분의 토양에서  $^{210}\text{Pb}$ 의 평균체류시간이 물이나 침식에 의한 제거에 대해 수천년 시간 단위가기 때문에 (Benninger et al., 1975) 과거 약 100년동안 강한 침식작용이나 혼합 등에 의해 손상되지 않았고,  $^{210}\text{Pb}$ 의 공급률이 그 시간에 걸쳐서 일정한 토양일 경우에 대기

**Table 2. Concentration of <sup>210</sup>Pb and <sup>137</sup>Cs from soil samples of Kwangleung, Kyunggido, Korea.**

Depth(cm)	<sup>210</sup> Pb(mBq g <sup>-1</sup> )	<sup>137</sup> Cs(mBq g <sup>-1</sup> )
0-1	263±7.97	59.8±5.33
1-2	223±37.5	44.7±4.00
2-3	157±29.0	39.8±3.67
3-4	192±36.3	41.5±3.67
4-5	---	---
5-6	144±23.7	37.0±3.33
6-7	133±21.8	37.7±4.33
7-8	121±24.2	37.7±3.33
8-9	138±19.2	40.7±3.67
9-10	85.2±17.0	24.0±2.17
10-13	---	---
13-14	57.7±12.0	4.67±0.50
14-17	---	---
17-18	68.2±13.5	1.33±0.17

\* not determined



**Fig. 3. The depth profile of <sup>210</sup>Pb concentration in soil from Kwangleung, Korea.**

를 통하여 공급된 <sup>210</sup>Pb의 농도 자료는 다른 핵종들의 추적 및 거동을 연구하는데 유용하게 이용될수 있다.

이러한 계에 있어서는 대기를 통하여 공급된 <sup>210</sup>Pb이

정상상태에 놓여 있기 때문에 단위시간에 단위면적당 <sup>210</sup>Pb이 토양으로 전송되는 양을 Q라 하면, 시간 t의 경과 후 단위부피의 토양중 <sup>210</sup>Pb의 농도, C(t)는

$$C(t) = Q e^{-\lambda t} \quad (1)$$

로 나타낼수 있다. 여기서 λ는 <sup>210</sup>Pb의 붕괴상수로써 0.031yr<sup>-1</sup>이다. 채취한 토양시추시료 중의 <sup>210</sup>Pb의 농도는 표층에서 깊이 10cm까지는 지수함수적으로 감소하여 위의 식을 이용하여 광릉 수목원에서 채취한 토양 시료에서 <sup>210</sup>Pb을 이용해서 구한 축적율은 약 0.32cm yr<sup>-1</sup>였다.

한편 대기를 통하여 공급되는 토양중 <sup>210</sup>Pb의 총량이 <sup>210</sup>Pb의 붕괴상수(λ)에 의한 축적률과 관계되기 때문에 대기로부터의 <sup>210</sup>Pb의 공급률(Flux)을 식(2)로부터 구할 수 있다(Benninger et al., 1975; Moore와 Poet, 1976; Nozaki et al., 1978).

$$\text{Flux} = \lambda^{210}\text{Pb} \times \text{Inventory} \quad (2)$$

토양중에 있는 <sup>210</sup>Pb의 총량은 각 토양 깊이에서의 농도에다 단위면적당 토양의 무게를 합산하면 된다. 위의 식에 의해 <sup>210</sup>Pb의 대기에서 포획되어 떨어지는 년 공급률(Flux)을 토양의 단위면적에 존재하는 과량 <sup>210</sup>Pb의 총량으로부터 계산하면, 단위 면적당 일년에 떨어지는 방사능량은 20.3mBq cm<sup>-2</sup> yr<sup>-1</sup>가 된다(그림 4). 박(1993)의 자료에 의하면 한반도 서해안에서 대기를 통한 연간 <sup>210</sup>Pb의 습상 강하량은 24.8mBq cm<sup>-2</sup> yr<sup>-1</sup>인데, 토양에 존재하는 과량의 <sup>210</sup>Pb의 축적률과 비교하면 광릉수목원 소리산 중턱에서 채취한 토양에는 대기를 통하여 공급되는 <sup>210</sup>Pb이 약 81%가 남아 있는 것으로 된다. 여기서 <sup>210</sup>Pb의 습상 강하량이 전부 대기로 방출된 <sup>222</sup>Rn의 붕괴에 의해 생성된 것이라고 가정하고 그의 건상 낙하량을 무시할 경우 그 나머지 부분인 약 19%는 유실 된다고 생각할 수 있다.

그러나 대기를 통하여 제거되어 공급된 <sup>210</sup>Pb이 과거 수백년 동안 그대로 남아 있다고 가정하고(Benninger et al., 1975), 대기로부터 공급된 입자중에 본래 존재하는 <sup>226</sup>Ra의 농도까지를 고려한 전체 <sup>210</sup>Pb의 총량은 앞에서 구한 시간을 고려했을 때 연간 공급량은 34.2 mBq cm<sup>-2</sup> yr<sup>-1</sup>로, 박(1993)에 의한 습상강하량의 약 1.6배에 해당한다. 이것은 대기를 통한 <sup>210</sup>Pb의 공급중에서 습상강하량에는 대기중에서 포획되지않고 입자 자체내에 존재하는 <sup>226</sup>Ra에 의한 <sup>210</sup>Pb의 양이 약 19%가

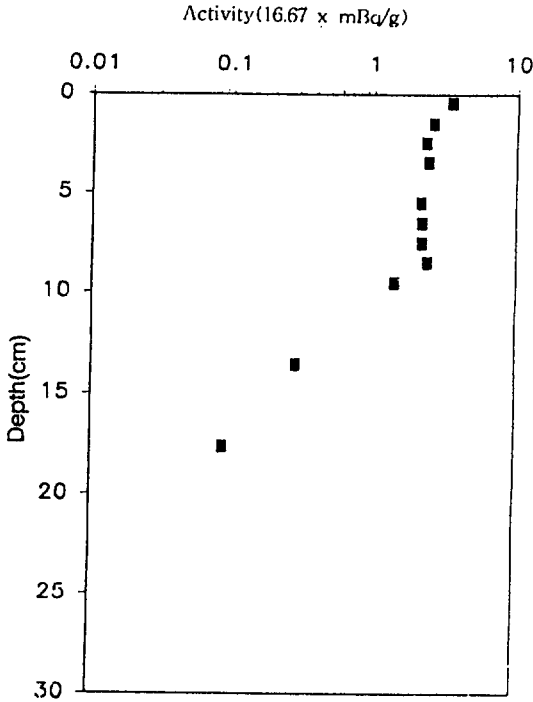


Fig. 4. The depth profile of <sup>137</sup>Pb concentration in soil from Kwangleung, Korea.

된다고 할 수 있으며 그외의 부분은 건상 낙하를 통하여 상당부분 공급 되어 진다는 것을 뜻한다.

이토양의 계를 정상상태라고 가정하고 건상 낙하의 양을 계산하면, 대기에서 습상 및 건상 강하에 의하여 지표면으로 들어오는 양은 34.2mBq cm<sup>-2</sup> year<sup>-1</sup>이고 습상 낙하량을 박(1993)의 논문에 근거해 24.8mBq cm<sup>-2</sup> year<sup>-1</sup>이라고 하면 건상낙하에 의한 양은 9.33 mBq cm<sup>-2</sup> year<sup>-1</sup>가 된다.

본 연구기간동안 조사한 건상 낙하의 플럭스(flux)는 월 평균 249±28mBq g<sup>-1</sup> month<sup>-1</sup>로 국립환경연구원 에서 1990년 12월부터 1991년 5월까지 조사한 강하분진의 년 평균 317.5ton km<sup>-2</sup> year<sup>-1</sup>을 이용하여 계산하면 7.83mBq cm<sup>-2</sup> year<sup>-1</sup>인데 약 84%로 비교적 잘 일치한다. 여기서 건상낙하량은 주로 육상으로부터의 재부유에 의한 것으로 생각되며 재부유되는 입자는 주로 육상 등의 침식이 활발한 지역에서 행하여짐을 알 수 있다.

위의 결과를 종합하면 한반도에 강하하는 습상과 건상의 비율은 3 : 1 정도가 되고 건상 낙하하는 대부분이 바람, 빗물 및 침식작용에 의하여 제거되는 것으로 사료되

나 여기에 대하여는 습상 및 건상 낙하에 대한 더 구체적인 연구가 뒷받침되어야 한다고 사료된다.

### 3. 3 토양중의 <sup>137</sup>Cs

1949년 7월의 핵실험이후 많은 양의 인공방사능 핵종이 대기권과 성층권으로 배출되어 입자형태로 지표면으로 낙하하였다. 방사능 핵종을 운반하는 입자의 평균 직경은 대부분 0.1~0.5μm로 알려져 있으며(Graustein과 Turekian, 1986) Volchok(1980)은 인공방사능 낙하 감시소 근처에서의 <sup>137</sup>Cs의 양을 낙하량과 비교해 봄으로써 대부분의 토양은 <sup>137</sup>Cs에 대한 좋은 포획체라는 결론을 내렸다.

연구지역의 토양중 <sup>137</sup>Cs의 총량은 311mBq cm<sup>-2</sup>이다(그림 5). 이것은 일본에서 1988년까지 측정된 총 강하량 375mBq cm<sup>-2</sup>의 약 83%에 해당한다.

<sup>137</sup>Cs은 <sup>210</sup>Pb와는 달리 인공방사성 핵종으로 순간 입력의 성질을 가져 토양이나 퇴적물의 퇴적당시의 대기중 농도를 잘 반영하고 있기 때문에 <sup>210</sup>Pb로 연대를 측정하고 나서 혼합정도를 밝히는데 이용할 수 있으나 연구지역 토양중의 <sup>137</sup>Cs의 깊이별 농도는 그림 5와 같이 표층

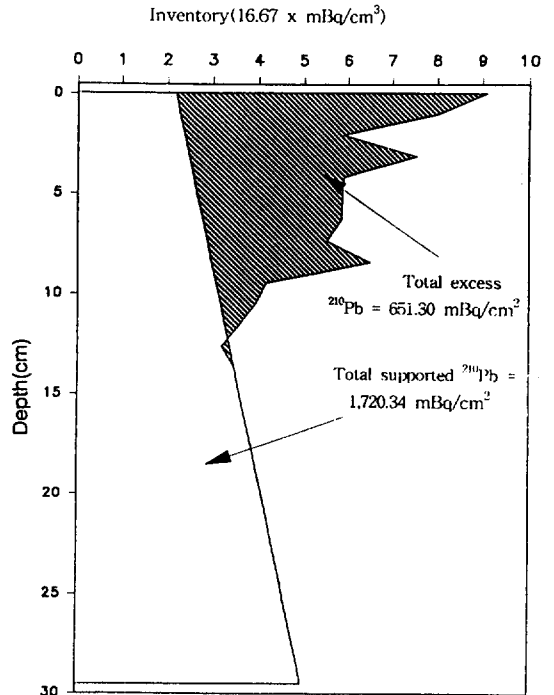


Fig. 5. Inventory profile of <sup>210</sup>Pb in soil from Kwangleung, Korea.

의 0~1cm 깊이에서는  $59.8 \pm 5.33 \text{ mBq g}^{-1}$ 으로 최대치를 보이고 그 아래에서 9cm까지는 큰 변화를 보이지 않고 있다. 그리고 9~10cm층에서  $24.0 \pm 2.17 \text{ mBq g}^{-1}$ 으로 위층에 비해 거의 절반 가량의 농도를 보이고 그 이후 부터는 급격히 감소하여 13~14cm 층에서  $4.67 \pm 0.50 \text{ mBq g}^{-1}$  그리고 17~18cm층에서는  $1.33 \pm 0.17 \text{ mBq g}^{-1}$ 으로 극히 미량만이 검출되었다. 만약에 대기를 통하여 공급된 <sup>137</sup>Cs가 토양에서 수직적으로 이동되지 않고 그대로 보존된다면 시간에 따른 강하량의 형태가 깊이별로 그대로 보존되어 있어야만 한다.

앞의 <sup>210</sup>Pb의 토양에서의 깊이별 분포에서 보듯이 연구지역의 토양은 상부에서의 공급이 깊이별로 정상 상태로 잘 보존되어 있다는 것을 보여주고 있다. 이것은 대기로부터 공급된 <sup>210</sup>Pb와 <sup>137</sup>Cs의 토양에서의 축적 및 이동형태가 다르다는 것을 뜻한다. 일반적으로 <sup>137</sup>Cs의 낙하는 핵폭발실험 등에 의해 대류권의 상층부와 성층권 하부까지 올라간 것등이 강수에 의해 대부분 지상으로 떨어지며 그것은 아주 미세한 입자( $0.1 \sim 0.5 \mu\text{m}$ )나 이온의 형태로 토양으로 스며들게 된다.

따라서 토양에서의 상부 공극율이 큰 투수층에 머무르면서 대부분 토양입자에 흡착되기 때문일 것으로 사료된다. 이것은 연구지역의 토양이 표층에서 약 10cm는 푸석푸석한 형태를 띠고 그 하층부에서는 다소 경화된 모습을 보여주는 것과 일치한다(그림 7). 깊이 10cm의 연대는 <sup>210</sup>Pb의 농도로 부터 계산한 연령이 30년에 달한다. <sup>137</sup>Cs는 상부 10cm층에서만 과량이 발견되는 것이다.

<sup>137</sup>Cs의 수직분포를 토양에 입력된 당시의 농도를 알기 위하여 <sup>210</sup>Pb을 사용하여 구한 축적율을 이용하여 깊이별로 붕괴된 양을 보정을 해주고 밀도에 따른 보정을 하여 그림 6과 같은 결과를 얻었다. 그림 6에서 깊이

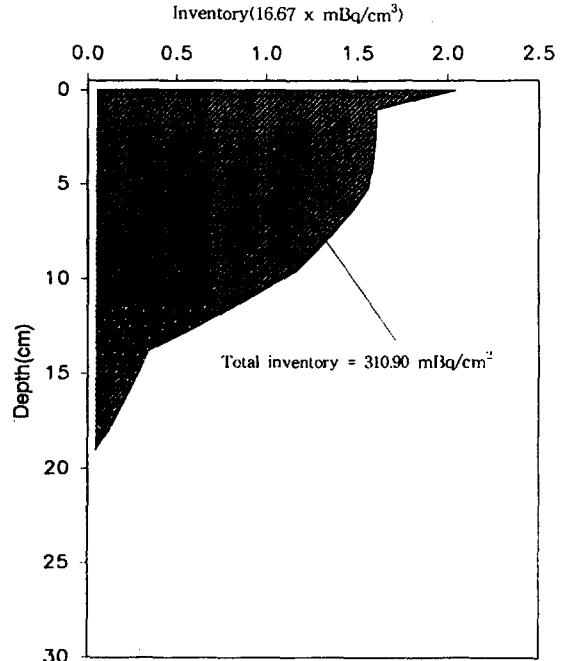


Fig. 6. Inventory profile of <sup>137</sup>Cs in soil from Kwa-ngeung, Korea.

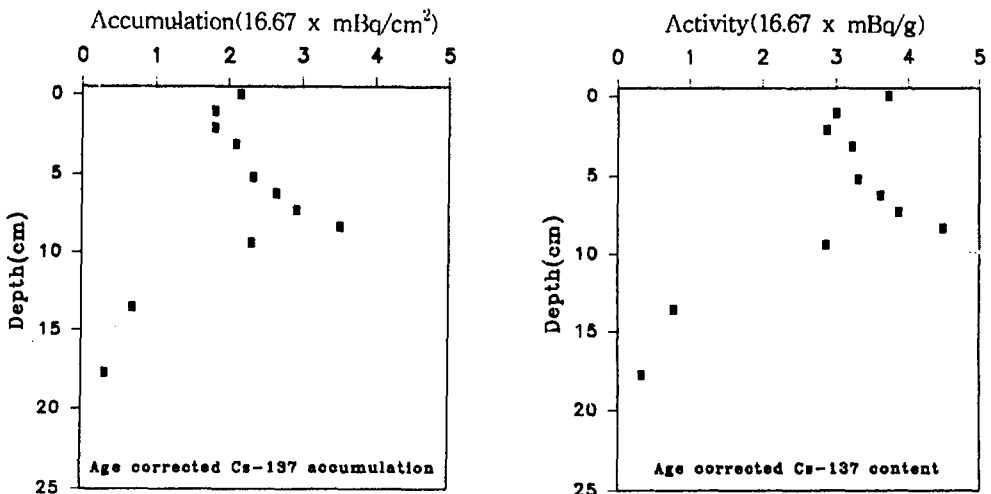


Fig. 7. Inventory profile of <sup>137</sup>Cs in soil from Kwa-ngeung, Korea.

8.5cm가 핵실험에 의한 대기중 농도가 가장 높을때인 1963년이고 표층의 연도는 체르노빌 원자력발전소 사고가 있는 1986으로 추정된다.

#### 4. 결 론

한반도 중부 서해안에 내리는 인공방사성 핵종의 양 및 거동을 알기 위하여 경기도 안산에 위치한 한국해양연구소 옥상에 습상낙하 및 건상낙하 채집기를 설치하여, 습상낙하 시료는 1994년 5월부터 9월까지 건상낙하 시료는 5월에서 10월까지 채취하여  $^{137}\text{Cs}$ 를 분석하였다. 또한 토양에 침적되는 방사능의 농도 및 거동을 파악하기 위하여 경기도 광릉수목원에서 토양시료를 채취하여 인공 방사성  $^{137}\text{Cs}$  및 천연 방사성  $^{210}\text{Pb}$ 을 분석하였다.

빗물시료의 분석 결과 5월은 총 강우량이 140.8mm로 일회 평균 강우량은 46.7mm를 기록하였고 이때 빗물속에 포함된  $^{137}\text{Cs}$ 의 양은  $4.95 \sim 11.96 \text{mBq m}^{-2}$ 의 분포를 보였으며 평균  $7.77 \text{mBq m}^{-2}$ 를 나타냈으나 6, 7, 8 및 9월에는 측정 하한치 이하의 농도를 보였으며, 건상시료에서는 5월에  $4.00 \pm 0.33 \text{mBq g}^{-1}$  10월 시료에서는  $3.00 \pm 0.50 \text{mBq g}^{-1}$ 이 검출 되었고 그 나머지 달에는 측정 하한치 이하의 농도를 보였다.

토양의  $^{137}\text{Cs}$  및  $^{210}\text{Pb}$ 을 분석 결과  $^{137}\text{Cs}$ 은 농도 범위가  $1.33 \sim 59.8 \text{mBq g}^{-1}$ 의 분포를 보였고, 반감기를 고려한 연대보정으로 산출한 깊이별 분포는 8.5cm에서 최대값을 보였다. 이는  $^{210}\text{Pb}$ 를 이용하여 측정한 축적율 ( $0.32 \text{cm yr}^{-1}$ )과 대기중 핵실험이 최대였던 1963년에  $^{137}\text{Cs}$ 의 낙진량이 최대였음을 고려하였을때의 결과와 거의 일치한다. 토양에 잔존하는  $^{137}\text{Cs}$ 의 양은  $311 \text{mBq cm}^{-2}$ 으로 1960년도 부터 대기를 통하여 유입되어 지표면에 도달한 총량( $374 \text{mBq cm}^{-2}$ )의 83%를 함유하고 있으며, 인공방사능의 주 유입원은 성춘권으로 부터의 유입과 대류권을 통한 중국대륙 토양의 재부상에 의한 것으로 나타났다.

토양 시료의 분석 결과를 보면  $^{210}\text{Pb}$ 는 깊이에 따라 지수함수적으로 감소하는 양상을 보였으며 이를 이용하여 토양의 축적율을 구하여 본 결과  $0.32 \text{cm yr}^{-1}$ 로 나타났다. 이때  $^{210}\text{Pb}$ 의 연간 플럭스는  $34.2 \text{mBq cm}^{-2} \text{yr}^{-1}$ 로 추산되었다.

#### 참 고 문 헌

국립환경연구원(1991) 대기오염물질의 장거리이동과 산성비 낙하에 관한 연구(3). 국립환경연구

원 보고서.

박경민(1993) 강수를 통하여 한반도 중부 서해안 지표면으로 공급되는 천연방사능핵종( $^7\text{Be}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ )에 관하여. 이화여대 석사학위 논문 pp.13-23.

Aoyama M., K. Hirose and Y. Sugimura(1991) The temporal variation of stratospheric fallout derived from the Chernobyl accident, J. Environ. Radioactivity. 13:103-115.

Benninger, L.K., D.M. Lewis and K.K. Turekian(1975) The use of natural Pb-210 as a heavy metal tracer in the river-estuarine system, in Marine Chemistry in the Coastal Environment, Symp. Ser. 18, edited by T.M. Church, American Chemical Society, pp.201-210.

Bleichrodt, J.F., and E.R. van Abkoude(1963) On the deposition of cosmic-ray produced beryllium-7. J. Geophys. Res., 68, 5283-5288.

Burchfield, L.A., J.D. Akridge, and P.K. Kuroda(1983) Temporal distribution of radiostrontium isotopes and radon daughters in rain water during a thunderstorm, J. Geophys. Res., 88, 8575-8584.

Dibb, J.E.(1989) Atmospheric deposition of beryllium-7 in the Chesapeake Bay region, J. Geophys. Res., 94(D2), 2261-2265.

Graustein, W.C. and K.K. Turekian(1983)  $^{210}\text{Pb}$  as a tracer of the deposition of sub-micrometer aerosols, in precipitation scavenging, dry deposition and resuspension, Edited by H.R. Pruppacher, R.G. Semonin, and W.G.N. Slinn. Elsevier, New York. pp.1315-1324.

Graustein, W.C. and K.K. Turekian(1983)  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{137}\text{Cs}$  in air and soils measure the rate and vertical profile of aerosol scavenging, J. Geophys. Res., 91, 14355-14366.

Hirose K., M. Aoyama, Y. Katsuragi, and Y. Sugimura(1987) Annual deposition of Sr-90, Cs-137 and Pu-239, 240 from the 1961-1980 nuclear explosions using a simple model, J. Meteor. Soc. Japan. 65, 259-277.



- Hirose K., S. Takatani and M. Aoyama(1993) Wet deposition of radionuclides derived from the Chernobyl accident, *J. Atmos. Chem.*, 17, 61-71.
- Katsuragi, Y.(1983) A study of  $^{90}\text{Sr}$  fallout in Japan, *Pap. Met. Geophys.*, 33, 277-291.
- Katsumi, H. and S. Yukio(1984) Plutonium in the surface air in Japan, *Health Phys.* 46, 1281-1285.
- Katsumi H., S. Yukio and K. Yukio(1986)  $^{90}\text{Sr}$  and  $^{239+240}\text{Pu}$  in the surface air in Japan: Their concentrations and size distributions, *Pap. Met. Geophys.* 39, 255-269.
- Matsunami, T., A. Mizohata and T. Manuro (1979) Observations of deposition and atmospheric concentrations of  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^7\text{Be}$  and  $^{137}\text{Cs}$  in the Osaka, *Ann. Rep. Radiat. Cent. Osaka Prefect.*, 20, 1-4.
- Moore, H. E. and S.E. Poet(1976)  $^{210}\text{Pb}$  fluxes determined from  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{226}\text{Ra}$  soil profiles. *J. Geophys. Res.*, 81, 1056-1058.
- Moore, W.S.(1984) Radium isotope measurements using germanium detectors, *Nuclear Instruments and Methods in Geophys. Res.*, 223, 407-411.
- Noyce, J.R., T.S. Chen, D.T. Moore, J.N. Beck and P.K. Kuroda(1971) Temporal distributions of radioactivity and  $^{87}\text{Sr}/^{90}\text{Sr}$  ratios during rainstorms, *J. Geophys. Res.*, 76, 646-656.
- Nozaki, Y., D.J. DeMaster, D.M. Lewis and K. K. Turekian(1978) Atmospheric Pb-210 fluxes determined from soil profiles, *J. Geophys. Res.*, 83, 4047-4051.
- Poet, S.E., H.E. Moore and E.A. Martell(1972) Lead 210, bismuth 210 and polonium 210 in the atmosphere: Accurate ratio measurement and application to aerosol residence time determination, *J. Geophys. Res.*, 77, 6515-6527.
- Turekian, K.K., L.K. Benninger and E.P. Dion (1983)  $^7\text{Be}$  and  $^{210}\text{Pb}$  total deposition fluxes at New Haven, Connecticut and at Bermuda, *J. Geophys. Res.*, 88, 5411-5415.
- Volchok, H.L.(1980) Atmospheric deposition of man-made radioactivity, in polluted rain, Edited by T.Y. Toribara, M.W. Miller and P.E. Morrow, Plenum Press, New York. pp.435-448.